

SUBPRODUTOS INDUSTRIAIS COMO COMPONENTES POZOLÂNICOS EM ARGAMASSAS DE CAL AÉREA

Paulina Faria Rodrigues^{*}

Correio electrónico: mpr@fct.unl.pt

Fernando M. A. Henriques[†]

Correio electrónico: fh@fct.unl.pt

Resumo

As argamassas podem ter diversos tipos de aplicações em edifícios. No âmbito da conservação de edifícios históricos podem ser considerados os casos de utilizações em rebocos exteriores e interiores, no refechamento de juntas de alvenarias existentes ou como caldas de injeção para consolidação de alvenarias antigas. São também diferenciadas as características que as argamassas devem apresentar, de modo a darem resposta aos requisitos de cada tipo específico de aplicação. Entre estes destacam-se a necessária hidraulicidade das argamassas para aplicação, na forma de caldas, em injeções de consolidação do núcleo central de paredes espessas ou em zonas mais profundas no refechamento de juntas. Nestes tipos de aplicações, o endurecimento de argamassas à base de cal aérea, que se desenvolve por carbonatação, é muito limitado e lento, pelo reduzido contacto do hidróxido de cálcio da argamassa com o dióxido de carbono. Torna-se por isso imprescindível o recurso a argamassas hidráulicas, cuja presa se possa desenvolver, pelo menos parcialmente, por hidratação dos constituintes. Referem-se alguns problemas que podem ocorrer pela utilização de argamassas com ligantes hidráulicos correntes, à base de cimento. Apresenta-se a possibilidade do recurso a argamassas com base em cal aérea e componentes pozolânicos como hipóteses de argamassas hidráulicas compatíveis com os tipos de materiais e elementos existentes nos edifícios em questão. Descreve-se o tipo de reacção que ocorre entre o ligante utilizado e diferentes componentes pozolânicos que podem ser utilizados. Apresentam-se tendências ao nível de características deste tipo de argamassas e referem-se outros materiais, muitos deles resultantes de subprodutos industriais, que têm vindo a ser analisados para este tipo de utilização.

Palavras-chave: Edifício histórico, Conservação, Argamassa, Hidraulicidade, Pozolana.

^{*} Professora Auxiliar, Universidade Nova de Lisboa.

[†] Professor Catedrático, Universidade Nova de Lisboa.

1 Introdução

As argamassas são um dos componentes fundamentais dos edifícios, onde podem ter vários tipos de aplicações. São disso exemplo as aplicações em rebocos de protecção das alvenarias contra acções exteriores ou interiores, como caldas de injeção para consolidação de alvenarias antigas, no refechamento de juntas nas quais as argamassas são inexistentes ou tenham deixado de conseguir cumprir os objectivos a que se propunham. Podem ainda ser referidas aplicações em juntas de assentamento de alvenarias de diferentes materiais ou na reconstituição visual de elementos de pedra. Os primeiros destes tipos de aplicação são específicos de intervenções em edifícios históricos, enquanto os últimos tipos referidos dificilmente podem ser considerados no âmbito da conservação de edifícios (de acordo com a teoria actualmente vigente de conservação), configurando situações de restauro. Sendo tão diferentes os tipos de aplicação em que as argamassas podem ser utilizadas para aplicação em conservação de edifícios históricos, necessariamente serão também distintas as características que essas argamassas devem apresentar (de modo a darem resposta aos requisitos de cada tipo específico de aplicação). Para além das questões referidas, pela sua importância e condicionantes impostas às argamassas, deve ainda ser avaliado o tipo e estado da alvenaria e as condições envolventes ambientais.

Enquanto uma argamassa para aplicação em reboco exterior apresentará como imperativo principal a protecção contra a acção da água, para uma aplicada em reboco interior será mais condicionante a protecção contra acções mecânicas, enquanto para uma argamassa a aplicar no refechamento de juntas a estabilidade estrutural, a par com a protecção contra a água, serão fundamentais, mantendo-se a estabilidade estrutural como condicionante no caso de caldas para injeção. De modo a conseguir garantir as condicionantes apresentadas, uma argamassa para reboco exterior deverá apresentar baixa absorção de água por capilaridade e elevada permeabilidade ao vapor de água, enquanto outra aplicada em reboco interior deverá registar uma boa dureza superficial; uma argamassa para refechar juntas deverá apresentar baixa absorção de água, elevada permeabilidade ao vapor de água e alguma expansibilidade; uma calda para injeção deve registar facilidade de injeção [1].

Em face das características a exigir às diferentes argamassas a aplicar em edifícios históricos verifica-se que, contrariamente ao que sucede na indústria da construção em geral – em que a maior preocupação será a durabilidade da nova argamassa e os aspectos económicos associados –, para a conservação deste tipo de edifícios com elevado valor cultural, a questão prioritária deve estar centrada na durabilidade da alvenaria que a argamassa é suposto proteger. A argamassa deve assim, contribuir para a preservação física dos materiais e

estruturas existentes durante o período de tempo em que possa estar funcional, e ser passível de ser removida, sem produzir danos, quando perder essa funcionalidade. Este último aspecto refere-se à questão da reversibilidade, fundamental para a definição das características físicas e mecânicas das argamassas de substituição, uma vez que se deve procurar que estas cumpram o seu papel protector da alvenaria durante o maior período de tempo possível, mas que possam ser substituídas quando a sua vida útil terminar, sem causarem danos à alvenaria.

2 Características Principais das Argamassas

Tendo por base um artigo recente [1], apresentam-se mais em detalhe as características principais das argamassas de substituição, em função do seu tipo de aplicação.

a) Argamassas para rebocos exteriores

As características principais das argamassas para rebocos exteriores necessárias para a protecção das alvenarias nas quais estejam aplicadas, de forma a reduzir a sua degradação, são:

- baixa absorção capilar, quer em termos de velocidade de absorção, quer quanto à quantidade total de água absorvida;
- boa permeabilidade ao vapor de água, de modo a possibilitar a evaporação da água que se infiltre na argamassa; sem ser excessiva para não induzir a possibilidade de ocorrência de criptoflorescências, pela cristalização de sais solúveis no seio da argamassa ou na interface entre o revestimento e o suporte;
- estabilidade dimensional tanto ao nível de baixa retracção por secagem, como a mais longo prazo, evitando a criação de tensões entre a alvenaria e o revestimento, que possam provocar a perda de aderência entre elas;
- quanto às características mecânicas, as argamassas devem ser mais deformáveis e mais fracas que as alvenarias de suporte e que cada camada sucessiva;
- boa aderência, sem que o ponto anterior seja posto em causa;
- baixa libertação de sais solúveis, não só para a preservação da alvenaria como para a durabilidade da argamassa.

Do ponto de vista da prevenção da degradação de uma argamassa devem ser considerados os seguintes aspectos:

- boa resistência aos sais solúveis inevitavelmente presentes em alvenarias antigas, nomeadamente aos que têm acção eminentemente química, como é o caso dos sulfatos (em presença de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados podem conduzir à formação de etringite e taumasite – sulfo-silicatos e sulfo-aluminatos de cálcio hidratados, muito expansivos e destrutivos) e aos que

actuam essencialmente de forma mecânica, como os cloretos (necessidade de elevadas resistências mecânicas e/ou elevadas porometrias, de modo aos poros da argamassa possuírem espaço suficiente para os sais poderem cristalizar e dissolver-se no seu volume, sem produzirem tensões na envolvente);

- boa resistência a ciclos de gelo/degelo, acção puramente mecânica que requer características semelhantes às referidas no caso dos cloretos e simultaneamente, reduzida absorção e retenção de água;
- boa evaporação da água, para se minorarem os efeitos do gelo e do transporte e cristalização dos sais solúveis;
- resistências mecânicas suficientemente altas de modo a suportarem as acções anteriormente referidas e por acção de choques;
- presa em período de tempo suficientemente curto para prevenir deteriorações devido a resistências mecânicas iniciais insuficientes.

b) Argamassas para refechamento de juntas

As juntas existem para distribuição das tensões de um elemento da alvenaria para outro, aumentando o coeficiente de atrito que previne os elementos de se movimentarem da sua posição. Deste modo é fundamental que uma argamassa para refechamento de juntas possua:

- resistência à compressão suficiente para suportar as tensões que existem ou podem vir a desenvolver-se na alvenaria;
- ligeira expansibilidade a fim de se criar uma boa base para a distribuição de tensões, uma vez que qualquer redução da área de contacto entre as unidades da alvenaria e a argamassa da junta contribui para o aumento das tensões nessa zona;
- capacidade de atingir cura adequada mesmo em zonas com dificuldade de acesso do dióxido de carbono (caso de preenchimento de juntas profundas), o que requer alguma hidraulicidade;
- boa resistência aos sais solúveis, na interface com a atmosfera;
- baixa absorção capilar da água e elevada permeabilidade ao vapor da água, compatíveis com o tipo e características das unidades da alvenaria (especialmente em casos em que a alvenaria vai ficar à vista, sem protecção por revestimento); compatibilização do desempenho – que normalmente requer reduzida compacidade da argamassa – com os requisitos anteriores de elevada resistência mecânica.

Tal como no caso das argamassas para reboco, também no caso das argamassas para refechamento de juntas a situação é contraditória entre alguns dos requisitos que as argamassas devem cumprir, sendo a maior dificuldade a procura do equilíbrio certo entre estes factores discrepantes. Enquanto as argamassas de reboco não devem apresentar qualquer tipo de fendilhação, esta não será condicionante no caso de argamassas para refechamento de juntas

(especialmente em paramentos que venham a ser posteriormente revestidos). No entanto, as argamassas para refechamento de juntas e respectivas características devem ser avaliadas a partir do seu tipo específico de aplicação. Assim, pode distinguir-se entre:

- argamassas para refechamento de juntas à vista (não revestidas)
 - aplicadas junto à superfície (até 3cm de profundidade)
 - aplicadas em profundidade
- argamassas para refechamento de juntas de alvenarias revestidas.

Verifica-se que as argamassas para refechamento de juntas de alvenarias revestidas e aplicadas em profundidade correspondem a situações menos exigentes do que as aplicadas expostas à superfície, uma vez estas últimas, para além do aspecto estrutural, têm também de ter em conta o comportamento face à capilaridade e o modo como resistem à acção dos sais solúveis. Por vezes recorre-se à aplicação de um tipo de argamassa em profundidade menos elaborada em termos de características (e geralmente menos dispendiosa), comparativamente à utilizada à superfície. Compatibilizados com os elementos da alvenaria e com as argamassas utilizadas mais em profundidade, estas argamassas para aplicação à superfície das juntas devem cumprir os seguintes requisitos: boa aderência e ligeira expansibilidade após a cura; baixa absorção capilar de água; elevada permeabilidade ao vapor de água; boa resistência aos sais solúveis; boa resistência a ciclos gelo/degelo; reduzida libertação de sais solúveis; características mecânicas adequadas; dureza superficial; cor e textura adequada.

c) Caldas para injeção

Embora o intuito da aplicação das caldas de injeção seja o acréscimo da estabilidade estrutural das alvenarias, a persecução destes objectivos depende, antes de mais, da capacidade de injeção das caldas e só depois das suas características mecânicas. O principal objectivo deriva da necessidade de preencher o maior volume de vazios (daí a necessidade de boa injectabilidade) e diminuir o mais possível a retracção.

Os requisitos a cumprir pelas caldas serão:

- capacidade de penetração em pequenos vazios, por condicionar o nível de consolidação;
- boa estabilidade, sem produzir separação entre a água e a restante massa da calda, nem segregação entre materiais de granulometrias diferentes;
- baixas viscosidade e resistência inicial ao escoamento;
- reduzida retracção para recriar a máxima compactação dos materiais originais;
- comportamento hidráulico para desenvolver resistências iniciais pouco depois de aplicada e continuar a cura mesmo em ambiente com pouco acesso de dióxido de carbono;

- características mecânicas compatíveis com as da alvenaria existente, especialmente em termos de deformabilidade, para que a alvenaria continue a poder deformar-se, rearranjando as tensões em presença;
- microestrutura (em termos de porosidade e de porometria – dimensão dos poros) compatível com a dos materiais existentes, que por sua vez a vão condicionar fortemente;
- estabilidade na presença de sulfatos que existem na maior parte das alvenarias antigas e que, combinando-se com os silicatos e aluminatos hidratados existentes em caldas com comportamento hidráulico, podem produzir compostos do tipo da etringite e da taumasite que são muito destrutivos e que podem pôr em causa as condições de segurança da alvenaria;
- reduzida libertação de sais solúveis, para não ocorrer o risco de aumentar ainda mais a taxa de deterioração da alvenaria.

Neste caso específico de aplicação de caldas por injeção, constata-se a dificuldade de garantir a reversibilidade das actuações, pelo que estas deverão ser particularmente bem estudadas e aplicadas.

3 Argamassas com base em ligantes hidráulicos

As argamassas com base em ligantes hidráulicos, de um modo geral e face às alvenarias antigas, apresentam: resistências mecânicas muito superiores; deformabilidade muito inferior; elevada libertação de teores em sais solúveis; desenvolvimento de compostos expansivos do tipo da etringite e da taumasite quando em contacto com sulfatos; susceptibilidade à fendilhação; baixa absorção capilar mas associada a baixa permeabilidade ao vapor de água, o que dificulta a secagem e a evaporação de água que se possa ter infiltrado; possibilidade de ganharem presa mesmo em ambientes muito húmidos e com fraca presença de dióxido de carbono. Consta-se que as características apresentadas pelas argamassas com base em ligantes hidráulicos revelam a sua incompatibilidade, a quase todos os níveis, face às alvenarias antigas. Daí que a sua aplicação em edifícios históricos deva ser muito condicionada.

4 Argamassas com base em cal aérea

As argamassas com cal aérea como ligante único, comparativamente às alvenarias antigas, apresentam como características: resistências mecânicas compatíveis mas obtidas a longo prazo; boa deformabilidade; elevada absorção capilar mas associada a elevada permeabilidade ao vapor de água, facilitando a secagem da água que se possa infiltrar; por aperto da argamassas após retracção inicial de secagem, capacidade de refechamento das fendas que se possam ter desenvolvido; reduzida resistência aos sais solúveis que actuem por

acção mecânica e química (casos dos cloretos e dos sulfatos); baixa dureza superficial; dificuldade em ganhar presa em ambientes muito húmidos ou com fraco contacto com dióxido de carbono. No entanto, através da incorporação de componentes pozolânicos (materiais contendo sílica e alumina amorfa) neste tipo de argamassas, desenvolve-se entre o hidróxido de cálcio da cal aérea e os silicatos e aluminatos dos constituintes pozolânicos, uma reacção designada como pozolânica, em que se formam silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (do tipo dos desenvolvidos nas reacções de hidratação de argamassas de ligantes hidráulicos). Através destes produtos, as argamassas com base em cal aérea desenvolvem um comportamento hidráulico, que lhes confere uma melhoria relativamente a algumas características. Entre elas contam-se a possibilidade de passarem a fazer presa mesmo em ambientes húmidos ou com reduzido contacto com dióxido de carbono, uma vez que a cura deixa de ocorrer exclusivamente por carbonatação do ligante, passando a desenvolver-se parcialmente também por hidratação.

4.1 Tipos de componentes pozolânicos

Como componentes pozolânicos podem utilizar-se pozolanas naturais, que são genericamente lavas vulcânicas meteorizadas ou pozolanas artificiais, que podem resultar directamente de subprodutos industriais ou basicamente de argilas após serem sujeitas a tratamento térmico.

Entre estas últimas podem salientar-se: cinzas volantes - subproduto resultante das centrais termoeléctricas funcionando a carvão mineral e que são sujeitas a moagem para aumentar a sua superfície específica (em Portugal são adquiridas na sua totalidade pelas cimenteiras para incorporação no “Cimento Pozolânico”); pós de barros vermelhos para construção civil resultantes de tratamentos térmicos a baixas temperaturas e durante curtos períodos de tempo; apresentando esta indústria elevados desperdícios (principalmente ao nível de material cozido), será possível o reaproveitamento do respectivo resíduo, desde que a temperatura de cozedura não tenha sido muito elevada (inferior a 900°C)[‡]; metacaulinos resultantes de tratamentos térmicos a temperaturas baixas de caulinos em pó (sendo o caulino um material utilizado em várias indústrias - caso, por exemplo, da indústria do papel -, será possível o reaproveitamento do respectivo resíduo industrial ; cinzas de casca de arroz resultantes de tratamentos térmicos a baixas temperaturas desse subproduto agro-industrial, de que Portugal é o maior produtor a nível europeu.

Como cada material de base, sujeito a determinado tratamento térmico e reduzido a pó com determinada superfície específica, produz um componente

[‡] Em granulometrias maiores do que a forma de pó e resultante de desperdícios cozidos a mais altas temperaturas, estes resíduos podem ainda ser utilizados substituindo parcialmente o agregado.

pozolânico com características específicas, é necessário otimizar o tratamento térmico e a moagem desses materiais, no sentido de, através do menor gasto energético, potenciar o desenvolvimento da sua máxima reactividade pozolânica. Esta situação, relativamente ao tratamento térmico, é obtida na fase em que a estrutura do material está no estado amorfo, antes de atingir a cristalização, podendo ser avaliada através de análises térmicas e por difracção por raios X. No que respeita à superfície específica, à partida quanto maior esta for, maior será a facilidade com que se desenvolverá a reacção pozolânica. No entanto, como a reacção pozolânica não depende apenas do componente pozolânico mas também da cal aérea, a optimização da reacção vai ainda depender da relação entre a sílica e a alumina presentes no componente pozolânico e o hidróxido de cálcio da cal aérea.

Por outro lado, face a condicionantes económicos, ecológicos e especialmente em termos de sustentabilidade ambiental, interessa incorporar resíduos que de outro modo poderiam ser utilizados em aplicações menores ou desaproveitados, conduzidos a aterro. Se paralelamente, através da sua incorporação, se conseguirem melhorar características das argamassas, garantindo que não se introduzem outros efeitos que possam ser prejudiciais, haverá que contabilizar ganhos, de acordo com as múltiplas perspectivas em presença.

4.2 Caracterização de argamassas de cal aérea e pozolanas

Em estudos que se têm vindo a desenvolver no seio do Grupo de Estudos de Património[§] da Universidade Nova de Lisboa, procedeu-se à caracterização de argamassas de cal aérea com incorporação de diversos componentes pozolânicos, de modo a poder aferir-se a sua contribuição em termos de: tratamento térmico a que tinham sido submetidos (no caso de componentes pozolânicos sujeitos a tratamentos térmicos para activação das suas características pozolânicas); proporção entre o traço de cal aérea e o do componente pozolânico (mantendo constante a relação entre o ligante e a areia); tipo de cura a que as argamassas foram sujeitas; alteração de características em função dos componentes pozolânicos utilizados, por comparação com a argamassa padrão de cal aérea.

Utilizaram-se nove componentes pozolânicos distintos: uma pozolana natural, na granulometria em que era comercializada em saco; uma cinza volante na granulometria utilizada para o fabrico de cimento pozolânico; três pozolanas resultantes de diferentes tratamentos térmicos a que foi submetido um pó de barro vermelho recolhido em cru por despoeiradores numa fábrica de cerâmica de construção civil; quatro metacaulinos resultantes de diferentes

[§] <http://www.dec.fct.unl.pt/seccoes/smtc/webdoc5.htm>

tratamentos térmicos a que foi sujeito um caulino moído, passado pelo peneiro ASTM nº30. Utilizou-se sempre a mesma areia de rio e uma argamassa de cal aérea hidratada e areia como padrão. Foram preparadas três formulações com cada um dos diferentes componentes, mantendo sempre a proporção de uma parte de ligante (cal aérea e componente pozolânico) e duas partes de areia de rio. Os provetes foram sujeitos a duas curas distintas: seca (23°C e 50% de humidade relativa - HR) e húmida (~95% HR). Em publicações anteriores [2, 3] foram relatados de forma exaustiva, os resultados da caracterização efectuada. De modo conciso, salientam-se os seguintes aspectos: a melhoria genérica das características obtidas com estas argamassas, por comparação com a argamassa só de cal aérea; que proporções de componentes pozolânicos superiores à de cal aérea parecem ser contraproducentes; a grande influência das condições de cura nas características obtidas. Verifica-se a necessidade de se terem cuidados particulares durante a cura, de modo a garantir-se que esta não seja seca. Tal situação deve-se ao facto da reacção pozolânica (para formação dos silicatos e aluminatos de cálcio hidratados) ser lenta e só poder ocorrer na presença da água. Considera-se que as condições de cura em situações reais poderão ser intermédias entre as consideradas no estudo, sendo previsível que originem valores intermédios nas várias características analisadas. No que respeita às características das argamassas salienta-se que:

- quanto aos requisitos relativos à absorção de água, de um modo geral as argamassas com pozolanas apresentaram comportamento mais eficiente que a argamassa só com cal aérea, muitas vezes equilibrando uma maior quantidade de água absorvida por capilaridade, por uma reduzida velocidade de absorção capilar inicial;
- relativamente à secagem da água por evaporação foi constatado um comportamento eficiente por parte da generalidade das argamassas, com boa permeabilidade ao vapor de água, que indicia a não constituição de barreira pára-vapor e compatibilidade com as alvenarias antigas;
- todas as argamassas registaram resistências mecânicas superiores às da argamassa só de cal aérea, mas que não vão conduzir ao desenvolvimento de tensões nos suportes por se admitir não ultrapassarem os níveis destes;
- não se registou libertação significativa de sais solúveis por parte das argamassas com qualquer dos componentes utilizados;
- as argamassas com pozolanas apresentaram resistências às acções dos cloretos e dos sulfatos superiores à da argamassa só com cal aérea.

Comparando as características das argamassas realizadas com incorporação de pozolana natural com as argamassas que incluem pozolanas artificiais, constatou-se que estas últimas conduzem a argamassas com melhor comportamento, o que deixa antever a grande potencialidade existente na incorporação de componentes pozolânicos resultantes de materiais sujeitos a tratamentos térmicos e especificamente resultantes de subprodutos industriais.

5 Conclusões

A investigação desenvolvida mostrou a potencialidade de muitos materiais para constituírem componentes pozolânicos aptos a serem introduzidos como parte do ligante de argamassas com base em cal aérea. Constata-se uma significativa melhoria das características das argamassas com base em cal aérea com a introdução dos componentes pozolânicos, sem que seja posta em causa a necessária compatibilidade mecânica, física e química com as alvenarias antigas (mantendo a função principal de protecção das paredes), sendo neste caso de salientar a melhoria ao nível do aumento da durabilidade das argamassas. Verifica-se ainda que as argamassas com base em cal aérea adquirem características hidráulicas, o que lhes permite alargar o seu campo de aplicação para casos de utilizações em ambientes muito húmidos ou com pouca presença de dióxido de carbono (casos de aplicações na forma de caldas para injeção e consolidação de núcleos de paredes ou no refechamento de juntas em profundidade). Para além de vantagens técnicas inerentes à melhoria do desempenho deste tipo de argamassas para aplicação em edifícios antigos, contam-se ainda com vantagens ao nível da sustentabilidade ambiental, uma vez que se reintroduzem no processo produtivo materiais que, de outro modo, poderiam ter pouca utilidade. Na continuidade desta linha de investigação, estão em curso estudos no sentido de: analisar a viabilidade de produzir metacaulinos a partir de resíduos de caulinos como subprodutos industriais da indústria do papel, que possam vir a ser incorporados em argamassas; aprofundar a análise das proporções óptimas entre a cal aérea e o componente pozolânico utilizado; avaliar as características obtidas com argamassas de cal aérea com cinzas de casca de arroz; aprofundar a avaliação da influência do tratamento térmico e da moagem nas características dos componentes pozolânicos para aplicação em argamassas.

6 Bibliografia

- [1] Henriques, F. M. A. *Challenges and Perspectives of Replacement Mortars in Architectural Conservation*, Workshop RILEM, Delft, University of Delft, Janeiro 2005.
- [2] Faria Rodrigues, P. *Argamassas de Revestimento para Alvenarias Antigas. Contribuição para o Estudo da Influência dos Ligantes*. Tese de Doutoramento, Universidade Nova de Lisboa, 2004.
- [3] Faria Rodrigues, P. *Argamassas de Cal Aérea e Componentes Pozolânicos*. CONSTRUÇÃO 2004 – 2º Congresso Nacional da Construção, Porto, FEUP, Dezembro 2004.

In Patorreb 2006, Porto, FEUP, Março 2006, p.295-305.